

Energieverlust von Elektronen in der Tritiumquelle des KATRIN-Experimentes

09.10.2007

Irina Wolff

- Einleitung
- Die Antwortfunktion
- Bestimmung der Energieverlustfunktion
- Zusammenfassung

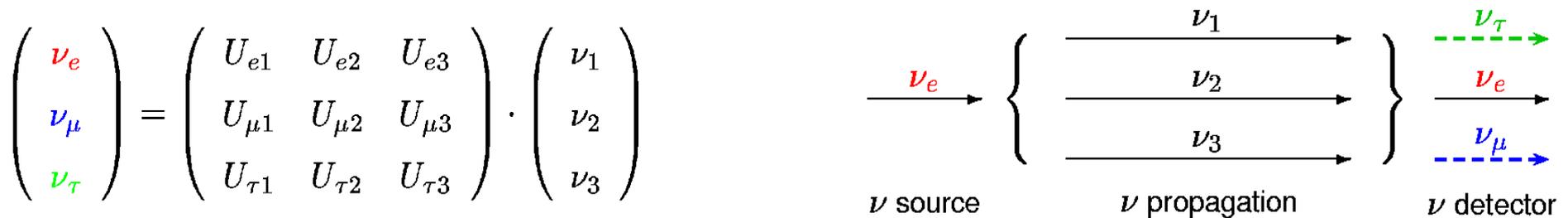
Das Neutrino

- 1930 postuliert Pauli das Elektronneutrino
- 1956 weisen Reines und Cowan das Elektronneutrino experimentell nach
- in 90er Jahren zeigen einige Experimente, dass es Neutrinooszillationen gibt (z.B. Superkamiokande, SNO)



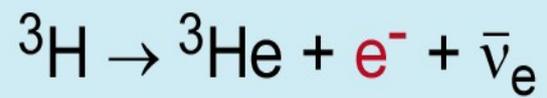
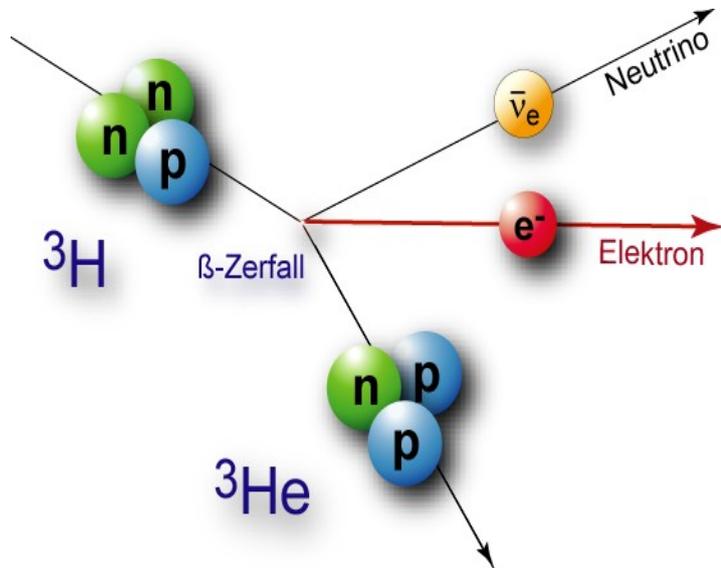
→ Neutrinos (Eigenzustände der schwachen WW) können als Überlagerung von Massen-EZ dargestellt werden

→ Neutrinos haben eine Masse



Aber: Oszillationsexperimente erlauben keine absolute Massenbestimmung!

Der Tritium-Betazerfall



Eigenschaften des Tritiums:

- Niedrige Endpunktenergie
 $E_0 = 18.6 \text{ keV}$
- Kurze Halbwertszeit
 $T_{1/2} = 12.3 \text{ a}$
- einfache Struktur

Der Tritium-Betazerfall

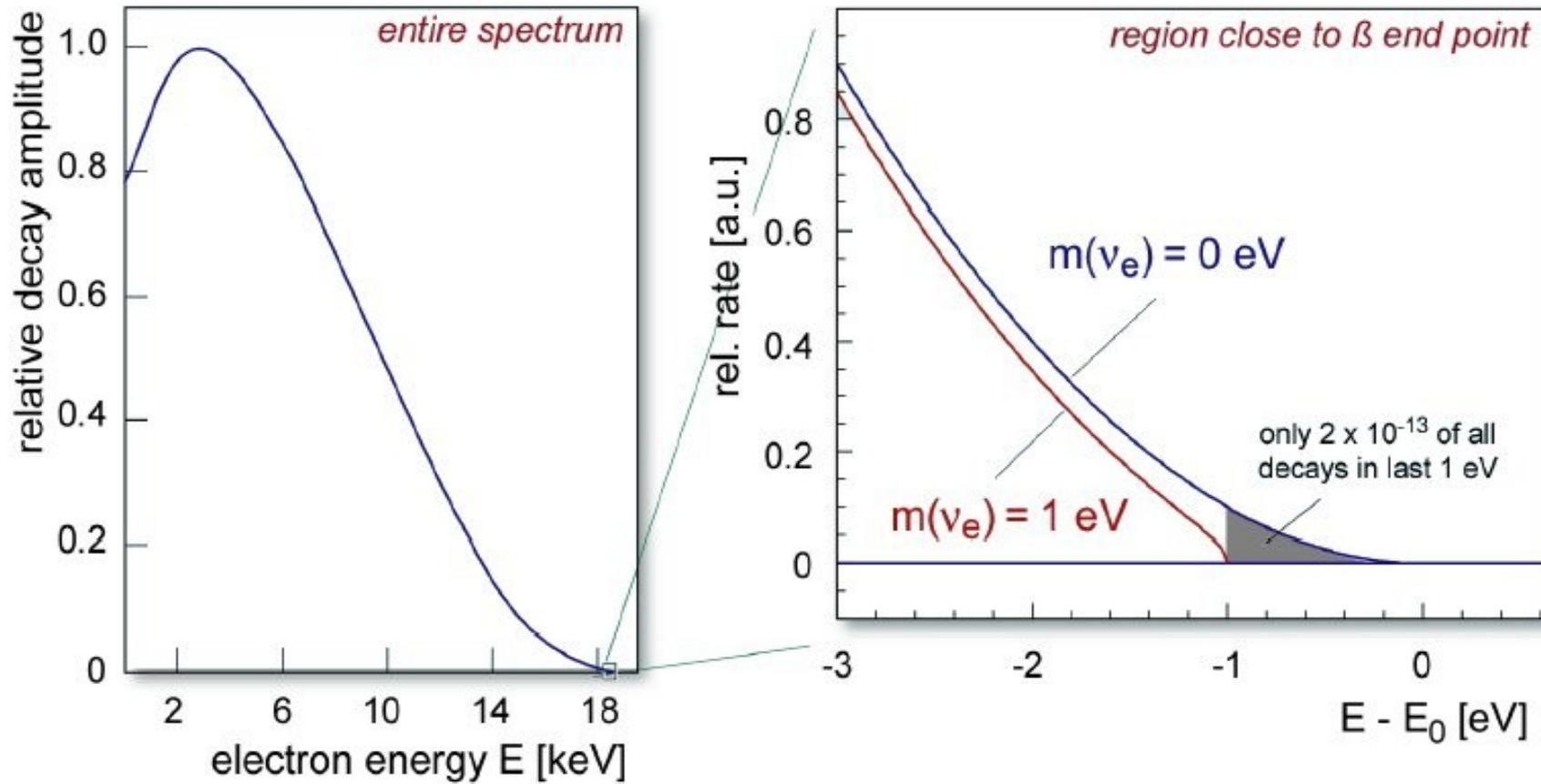


Abbildung: Energieverteilung der Beta-Elektronen

→ Bestimmung der Neutrinomasse aus der Kinematik des Betazerfalls!

Das KATRIN-Experiment

Windowless Gaseous Tritium Source (WGTS)

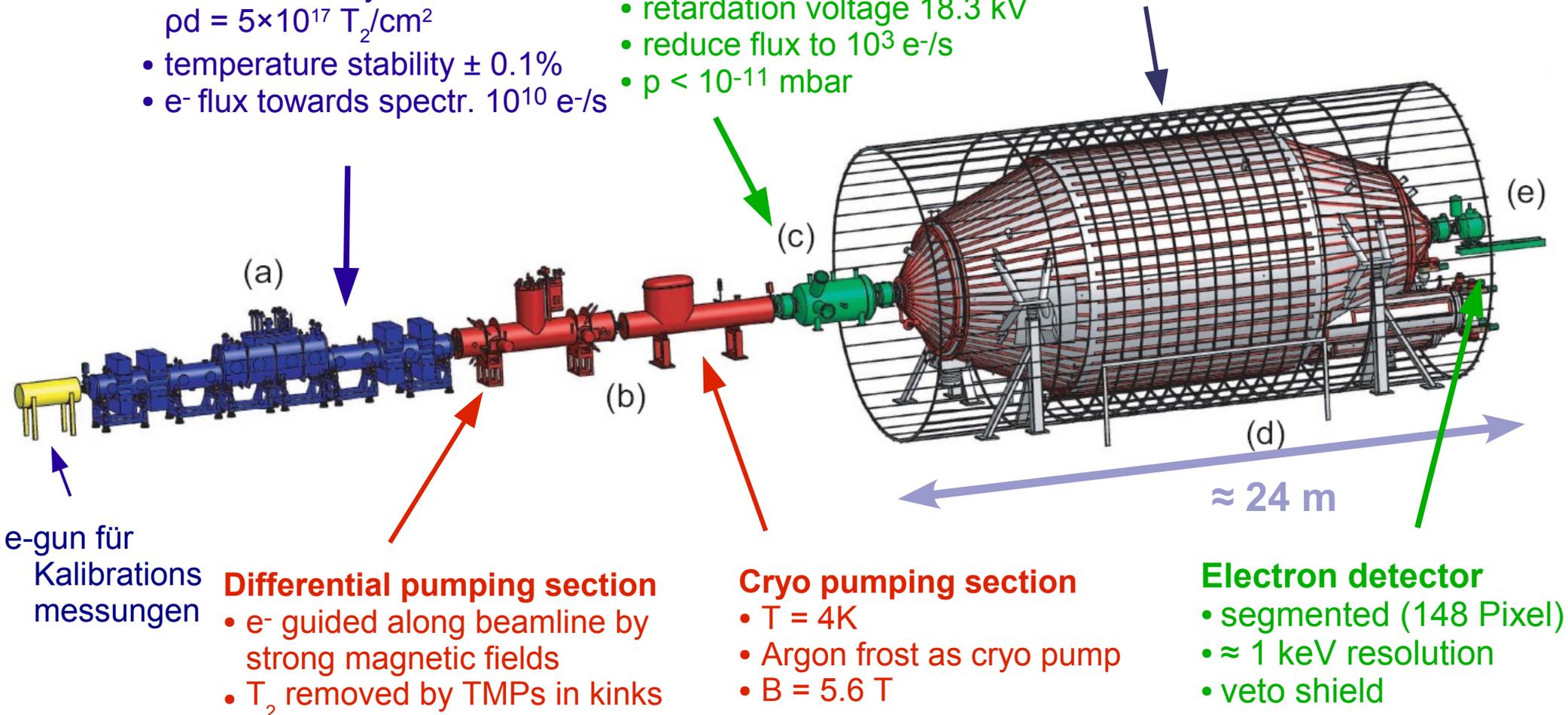
- Tritium flow rate:
 5×10^{19} molecules/s
- column density:
 $pd = 5 \times 10^{17} \text{ T}_2/\text{cm}^2$
- temperature stability $\pm 0.1\%$
- e^- flux towards spectr. $10^{10} \text{ e}^-/\text{s}$

Pre-Spectrometer (MAC-E)

- retardation voltage 18.3 kV
- reduce flux to $10^3 \text{ e}^-/\text{s}$
- $p < 10^{-11} \text{ mbar}$

Main-Spectrometer (MAC-E)

- 1 eV resolution at 18.6 keV (β endpoint)
- $p < 10^{-11} \text{ mbar}$
- 24 m length, 10 m diameter



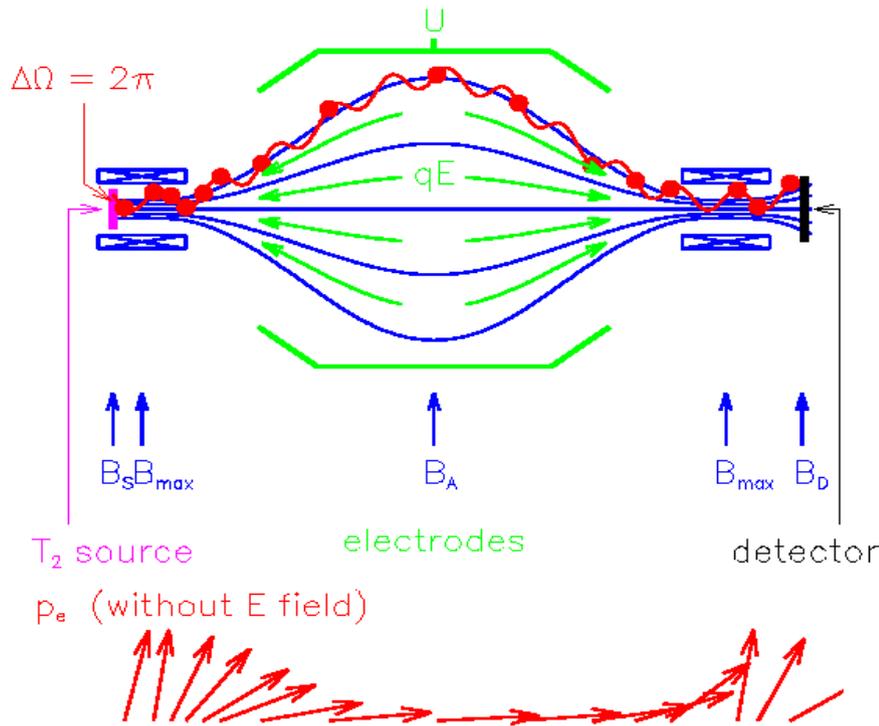
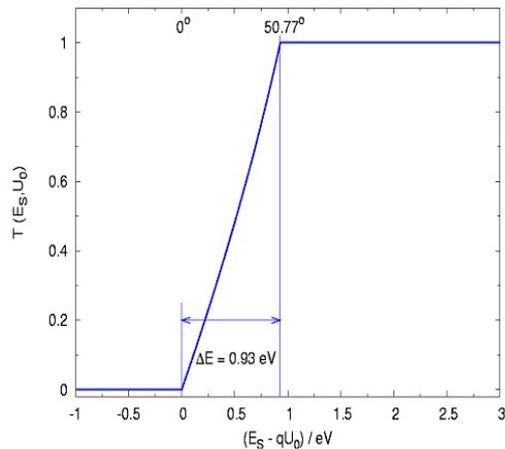
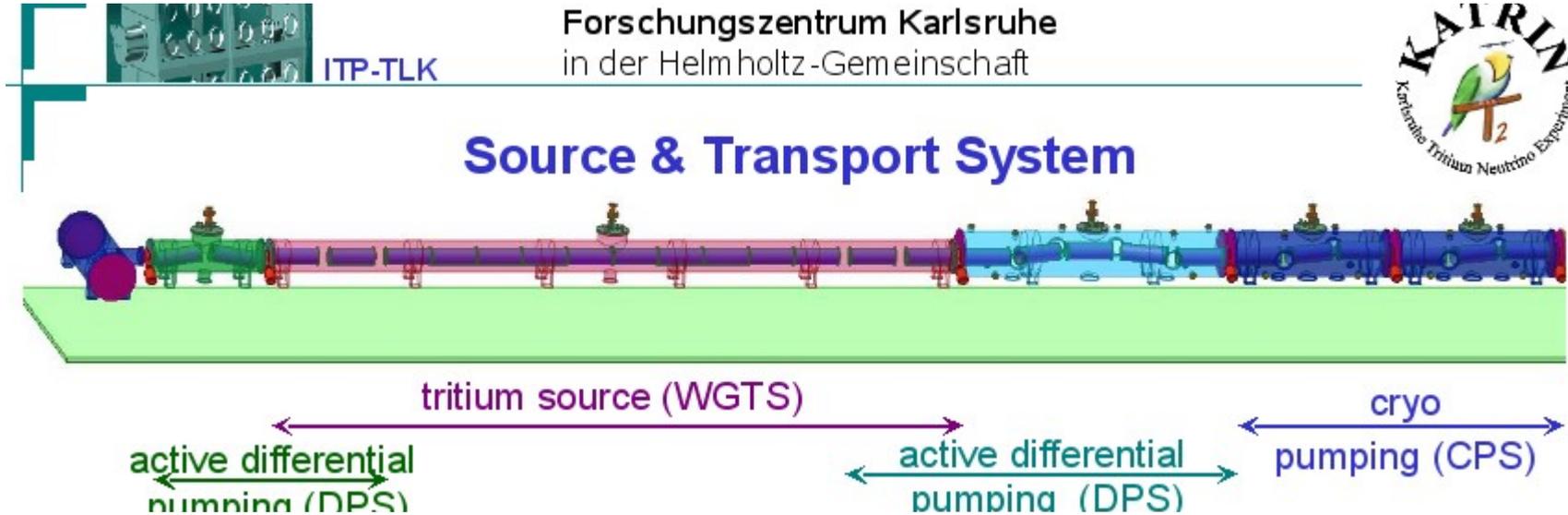


Abbildung: Prinzip des MAC-E-Filters



- Elektronen bewegen sich auf Zyklotronbahnen entlang der magnetischen Feldlinien
- Transmission der Elektronen wenn $E_{\parallel} > qU$;
Energiehochpassfilter
- Magnetisches Bahnmoment $\mu = E_{\perp} / B$ konstant
- Transformation des Impulses aufgrund magnetischer Gradientenkraft
 $\Rightarrow E_{\perp} \rightarrow E_{\parallel}$ im inhomogenen Magnetfeld

Die Tritiumquelle WGTS



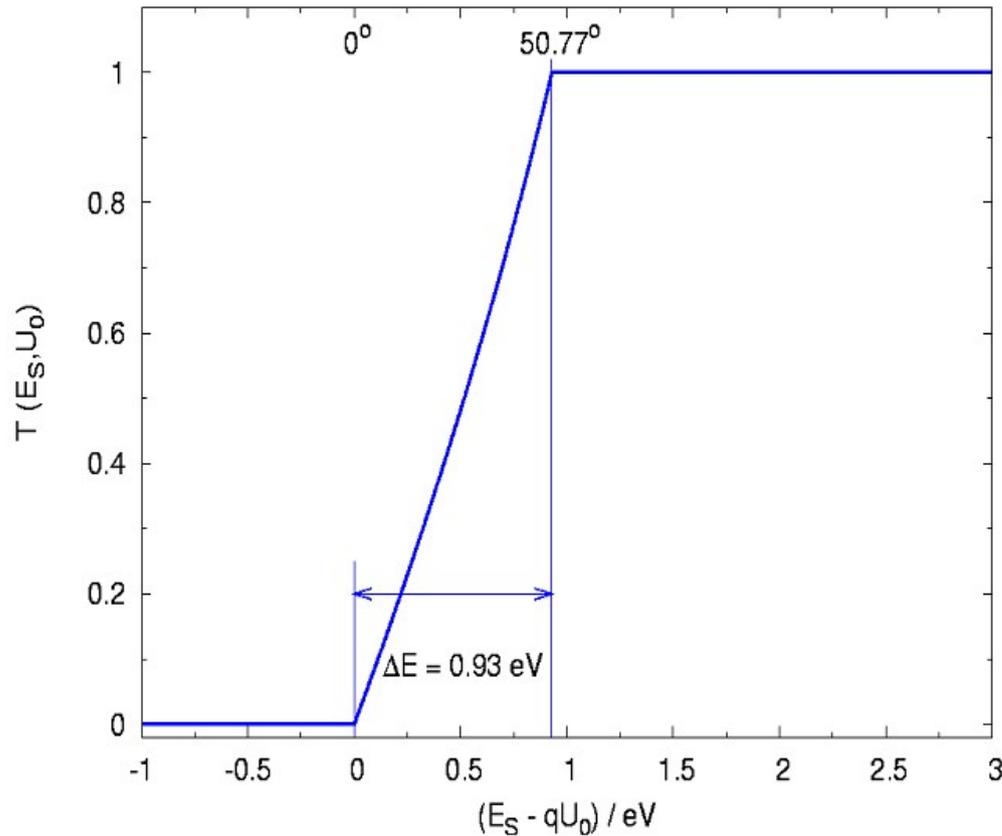
- Einleitung des Tritiumgases in der Mitte eines 10 m langen Rohres
- Abpumpen des T_2 an beiden Seiten der Quelle durch diff. Pumpstrecken
- Elektronen durch Magnetfeld der Quelle zu beiden Enden des Rohres geführt
- Optimale Säulendichte: $\rho d = 5 \times 10^{17} T_2 / \text{cm}^2$
- 40 g of T_2 / day

Die Antwortfunktion f'_{res}

$$f'_{res} = f_{charge} \otimes f_{bsc} \otimes \underbrace{f_{eloss} \otimes f_{trans}}_{f_{res}} \otimes f_{det}$$

- f_{charge} : elektrische Potentialverteilung innerhalb des Tritiums
- f_{bsc} : Rückstreuungsfunktion
- f_{eloss} : Energieverlustfunktion $f(\Delta E)$
- f_{trans} : Transmissionsfunktion $T(E, qU)$
- f_{det} : Energieabhängigkeit der Nachweiseffizienz des Detektors

- f'_{res} ist Teil der Anpassungsfunktion dN/dU
- dN/dU beschreibt gemessenes Betaspektrum
- Faltung des Betaspektrums mit der Antwortfunktion f'_{res}



- $T(E, qU)$ beschreibt die Abhängigkeit des transmittierten Anteils der Elektronen von deren Startwinkel und Energie
- Funktion hängt nur von den Magnetfeldern (und somit auch vom transmittierten Winkelanteil) ab
- $T(E, qU)$ berücksichtigt keine WW von Elektronen innerhalb der Quelle

Abbildung: Die Transmissionsfunktion $T(E, qU)$ in Abhängigkeit von $\Delta E = E_s - qU$

Die Energieverlustfunktion $f(\Delta E)$

- $f(\Delta E)$ berücksichtigt Energieverluste durch inelastische Stöße der Beta-Elektronen in der Quelle
- Funktion beinhaltet totalen WQ und energiedifferentiellen WQ

$$f(\Delta E) = \frac{1}{\sigma_{tot}} \cdot \frac{d\sigma}{d\Delta E}$$

$$\int f(\Delta E) = 1$$

Die Energieverlustfunktion für i-fache Streuung

$$\begin{aligned}
 f(\Delta E) &= P_0 \cdot \delta(\Delta E) + \sum_i \frac{P_i}{\sigma_{tot}^i} \cdot \underbrace{\frac{d\sigma}{d\Delta E} \otimes \dots \otimes \frac{d\sigma}{d\Delta E}}_{i\text{-fache Faltung}} \\
 &= P_0 \cdot \delta(\Delta E) + P_1 f(\Delta E) + P_2 (f \otimes f)(\Delta E) + \dots
 \end{aligned}$$

P_i : Wahrscheinlichkeit für i-fache Streuung

Die Antwortfunktion f_{res}

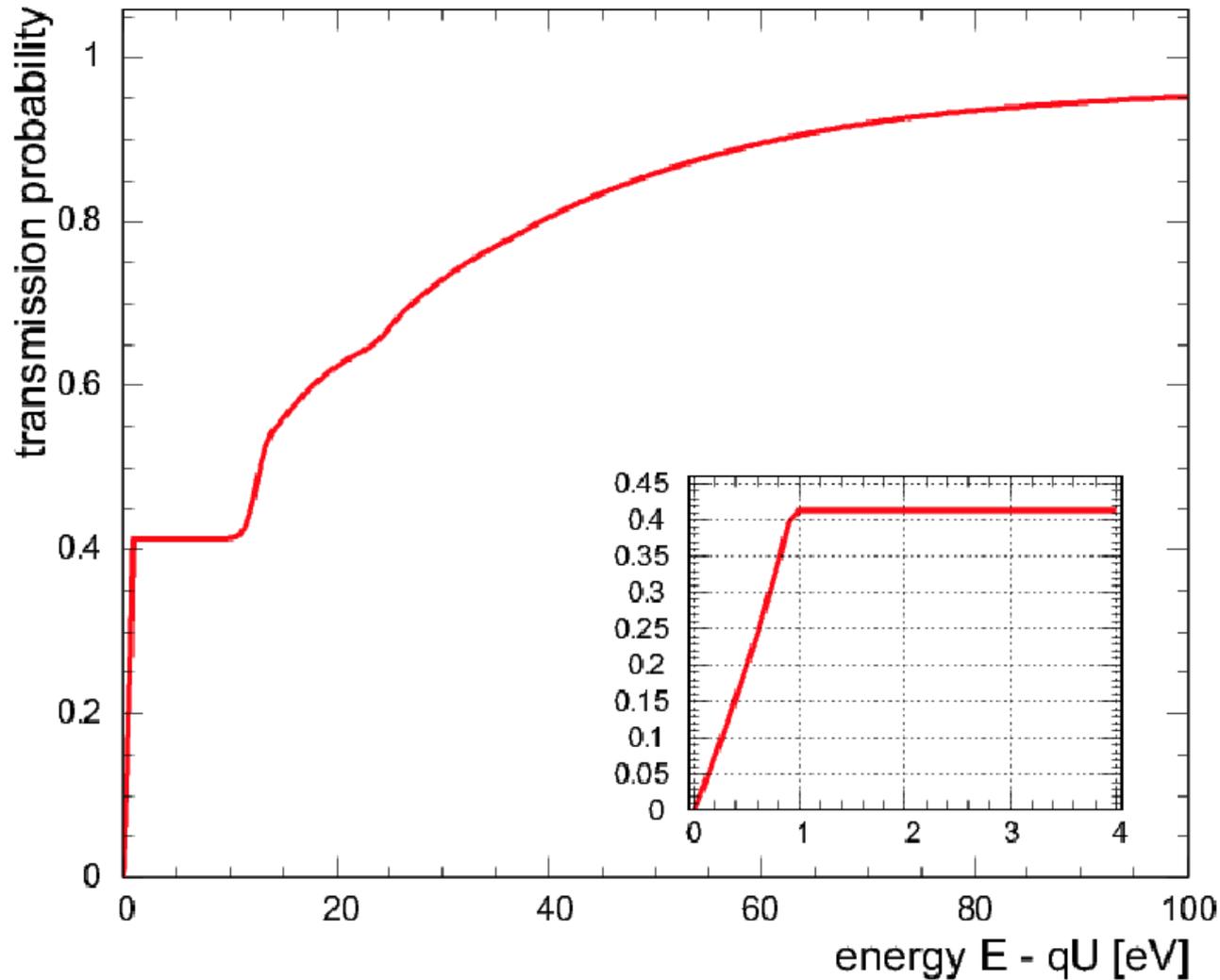


Abbildung: f_{res} des KATRIN-Spektrometers als Funktion der Überschussenergie

- e-gun benutzt zur Bestimmung der Transmissionsfunktion $T_{\text{egun}}(E, qU)$ und des energiedifferentiellen WQ $d\sigma/d\Delta E$
- Startenergie der Elektronen geg. durch HV e-gun + gaußverteilte Energieunsicherheit
- Durchführung von Messungen mit verschiedenen Säulendichten ρd
- $T_{\text{egun}}(E, qU)$ in Energieverlustmessung n-fach gefaltet mit $d\sigma/d\Delta E$

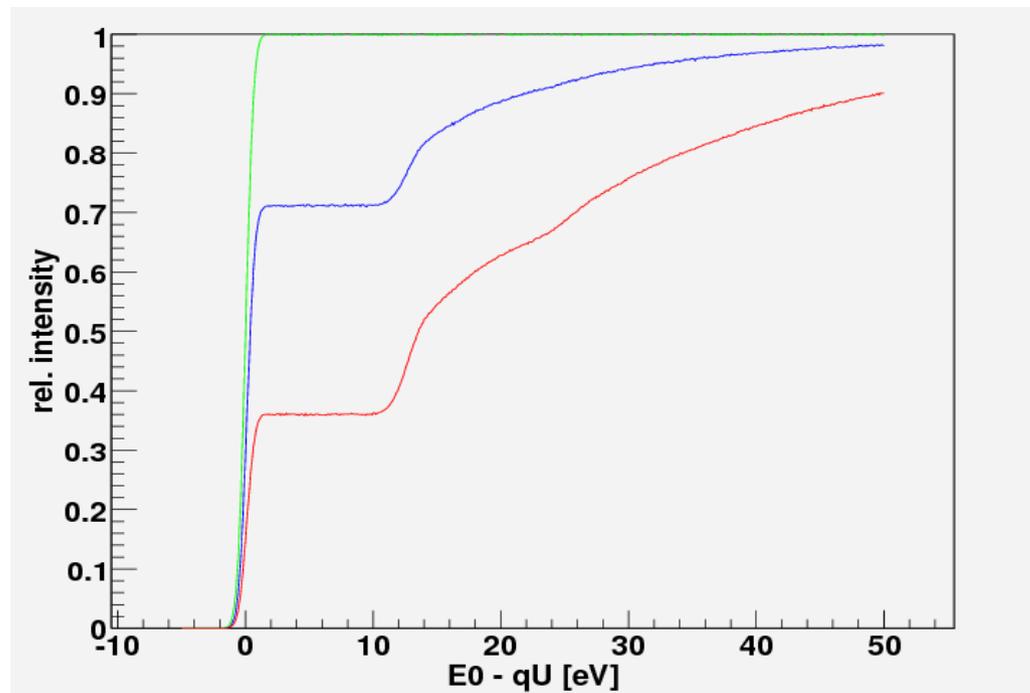


Abbildung: Energieverlustmessung für verschiedene Säulendichten ($\rho d = 0 \text{ cm}^{-2}$, $\rho d = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, $\rho d = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$) als Funktion der Überschussenergie

Entfaltung der Energieverlustmessung

- Abweichung der Energieverlustmessung von 1 definiert als $\epsilon(\Delta E)$
- Aufstellung eines Gleichungssystems

Messungen a,b,c

$$\epsilon^a(\Delta E) = P_1^a \cdot \epsilon_1(\Delta E) + P_2^a \cdot \epsilon_2(\Delta E) + \dots$$

$$\epsilon^b(\Delta E) = P_1^b \cdot \epsilon_1(\Delta E) + P_2^b \cdot \epsilon_2(\Delta E) + \dots$$

$$\epsilon^c(\Delta E) = P_1^c \cdot \epsilon_1(\Delta E) + P_2^c \cdot \epsilon_2(\Delta E) + \dots$$

- Durch Matrixinversion erhält man $\epsilon_i(\Delta E)$
- $T_{egun}(E, qU)$ erhält man aus Leermessung
- Entfaltung liefert $d\sigma/d\Delta E$

$$T_{egun}(E, qU) \otimes \frac{d\sigma}{d\Delta E} = 1 - \epsilon_1(\Delta E)$$

Die Entfaltung

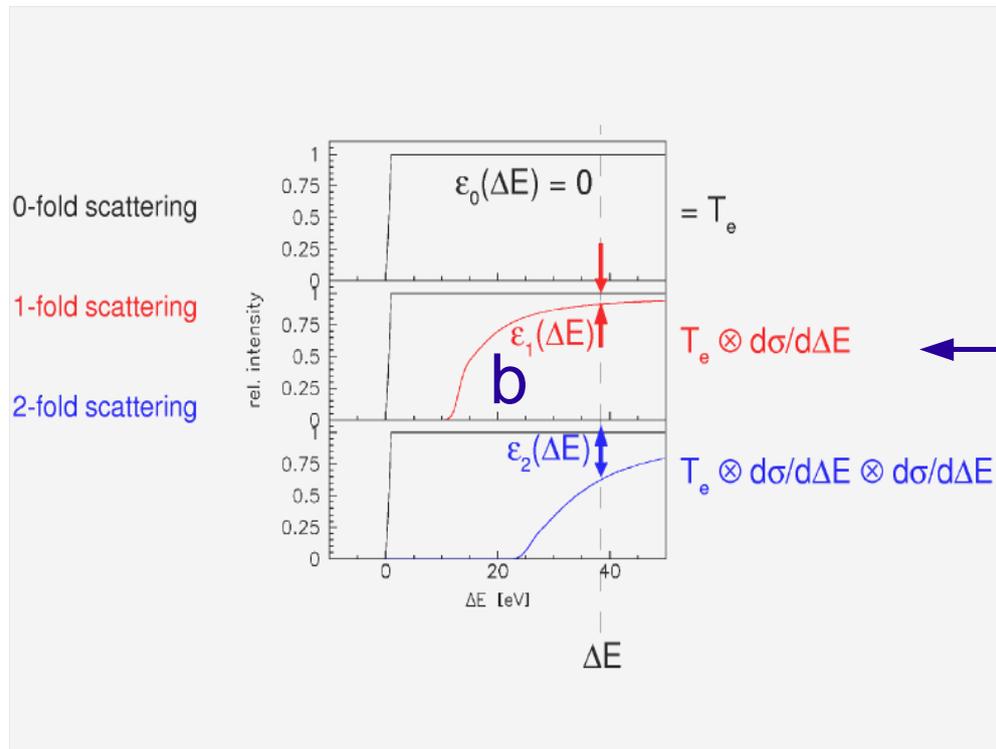


Abbildung: Gezeigt ist der theoretische Verlauf der entfalten und normierten Antwortfunktion f_{res} für Einfach- und Zweifachstreuung in Abhängigkeit der Überschussenergie.

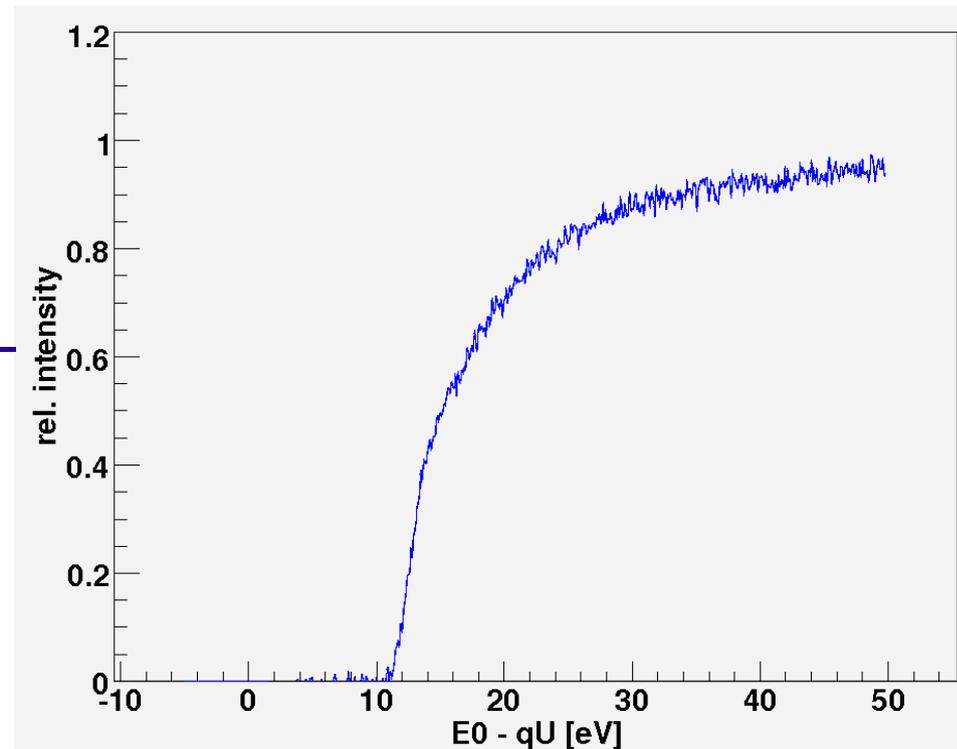


Abbildung: Dargestellt ist das simulierte Ergebnis für $\varepsilon_1(\Delta E)$. In der Funktion ist T_{egun} einfach gefaltet mit $d\sigma/d\Delta E$.

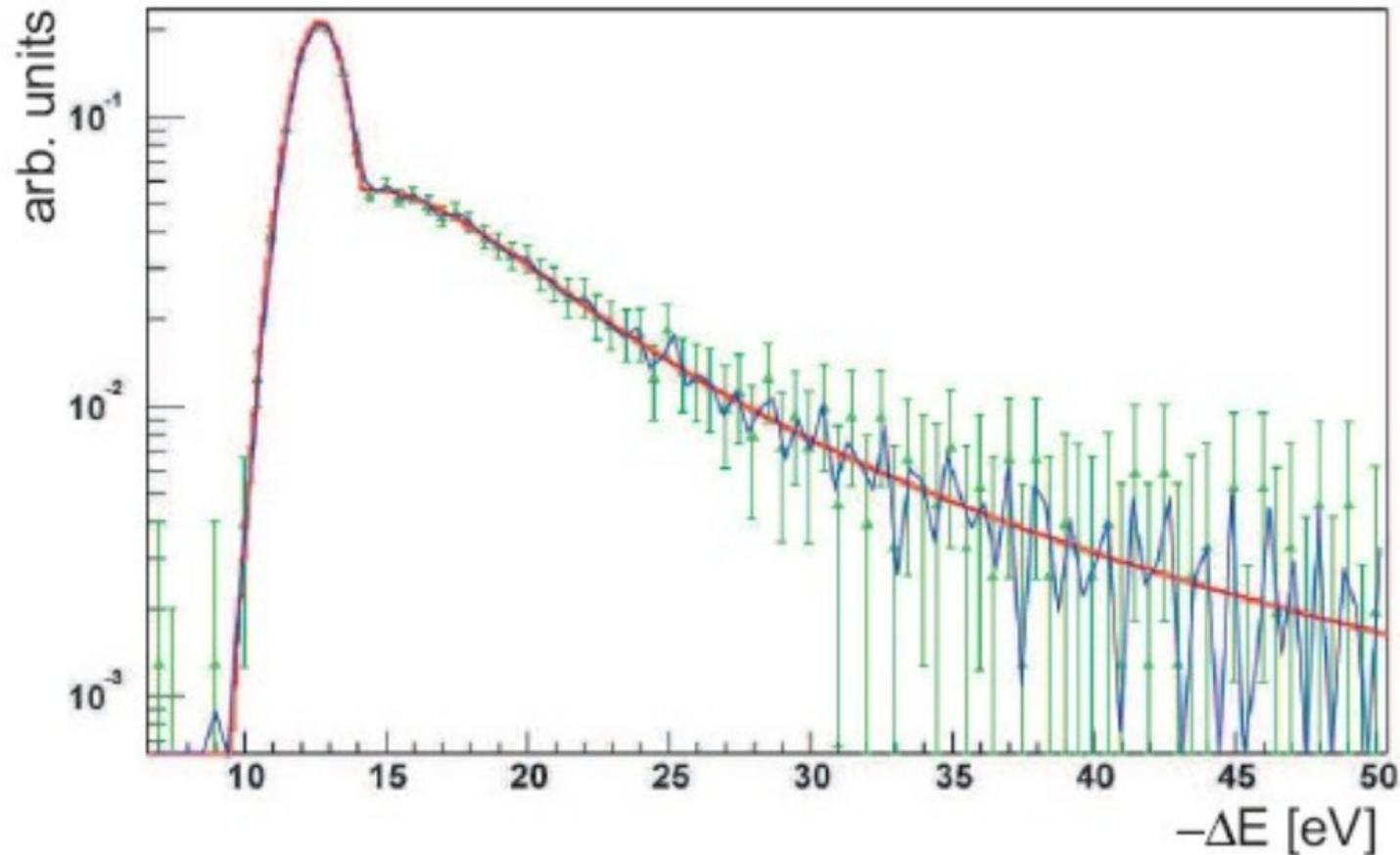


Abbildung: Ergebnis der Entfaltung einer simulierten Messung mit der Elektronenkanone. Die rote Kurve zeigt das Ausgangsmodell, die grünen Dreiecke stellen das Entfaltungsergebnis dar, die blaue Kurve ist ein Polynomfit an die Ergebnisse.

Messungen mit Hilfe einer Elektronenkanone bei verschiedenen Säulendichten der T_2 -Quelle erlauben die Bestimmung der experimentellen Transmissionsfunktion $T_{\text{egun}}(E, qU)$ und der Energieverlustfunktion $f(\Delta E)$.

Die genaue Kenntnis der Funktion $f(\Delta E)$ ist notwendig, da sie als Teil der Anpassungsfunktion zur Entfaltung des Tritium-Beta-Spektrums aus den KATRIN-Daten benötigt wird.

Es bleibt zu untersuchen, welchen Einfluss Energieverluste von Elektronen im Bereich der letzten 10 eV unterhalb der Endpunktenergie des Spektrums haben.